

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора Иванова Вадима Константиновича на диссертацию ФОМИНА Алексея Константиновича «Моделирование экспериментов с нейтронами и нейтрино в задачах фундаментальной физики на реакторах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертационная работа Фомина Алексея Константиновича посвящена вопросам моделирования нейтронных и нейтринных экспериментов на реакторах. Эти эксперименты играют основополагающую роль в решении фундаментальных проблем современной физики элементарных частиц, таких как измерение времени жизни нейтрона, поиск электрического дипольного момента нейтрона, поиск нейтрон-антинейтронных осцилляций, создание новых источников ультрахолодных нейтронов, поиск стерильного нейтрино.

Физика ультрахолодных нейтронов и нейтринная физика сейчас активно развиваются. Задача прецизионного измерения времени жизни нейтрона имеет большое значение для физики элементарных частиц и космологии, результаты этих измерений являются исключительно важными для проверки модели формирования Вселенной. С измерением времени жизни нейтрона связано исследование перехода реакторных антинейтрино в стерильное состояние.

Другая важная задача, которая прямым образом связана с проблемой CP-нарушения, заключается в поиске электрического дипольного момента нейтрона. Значительное продвижение в решении этих проблем связано с развитием методики ультрахолодных нейтронов. От создания новых источников ультрахолодных нейтронов высокой плотности во многом зависит прогресс в экспериментальных исследованиях по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций. Постановка этих экспериментов имеет целью прояснить вопросы о механизме возникновения Вселенной.

Все эти исследования являются сейчас **актуальными** – над ними работают многочисленные экспериментальные группы во всем мире. Обсуждению всех этих вопросов, моделированию экспериментов, призванных разрешать вышеупомянутые проблемы, и посвящена диссертация А.К. Фомина.

Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, списка обозначений и сокращений, списка литературы. Объем диссертации 208 страниц, в ней содержится 103 рисунка и 12 таблиц. Список литературы включает 225 наименований.

Во **введении** автор описывает круг решаемых вопросов, цели и задачи исследования. Описываются актуальность диссертации, ее научная новизна и практическая значимость. Приведены положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, обоснование достоверности результатов, информация об апробации работы и публикациях, а также структура и объем диссертации.

В **первой главе** рассмотрена проблема расхождения результатов экспериментов по измерению времени жизни нейтрона. В главе дан исторический обзор данного вопроса. В 2004 году был получен результат эксперимента с гравитационной ловушкой ультрахолодных нейтронов, отличный от результатов предыдущих экспериментов. Для решения проблемы расхождения результатов автором был проведен анализ двух более ранних экспериментов и найдены систематические поправки. После внесения поправок в 2010 году было получено новое среднемировое значение времени жизни нейтрона. С новым значением времени жизни нейтрона устранено разногласие со Стандартной моделью, получено лучшее согласие с космологическими данными, найдено расхождение в результатах между экспериментами на пучках и с хранением в ловушках, получен вклад в реакторную антинейтринную аномалию из-за изменившейся эффективности нейтринных детекторов. В 2013 году среднемировое значение времени жизни нейтрона Particle Data Group стало совпадать с полученным в диссертации.

Во **второй главе** проведены анализ и моделирование эксперимента по измерению времени жизни нейтрона MAMBO I. Приведено описание установки и метода измерений. Разработана Монте Карло модель эксперимента. В рассмотрение был включен эффект квазиупругого рассеяния ультрахолодных нейтронов на поверхности жидкого фомблина, открытый после проведения эксперимента. В результате моделирования получена поправка, после введения которой результат эксперимента начинает совпадать с результатом эксперимента с гравитационной ловушкой.

В **третьей главе** рассмотрен эксперимент по измерению времени жизни нейтрона с регистрацией неупруго рассеянных нейтронов. В главе описаны схема и метод измерений. Создана компьютерная модель эксперимента. Рассмотрен ряд систематических эффектов, каждый из которых дает отрицательную поправку для измеренного времени жизни нейтрона: неполное вытекание из внутреннего объема при измерениях с внешним объемом, нагрев нейтронов затворами, разная эффективность детектора тепловых

нейтронов для разных объемов. Получена суммарная поправка, после введения которой результат становится согласованным с результатом эксперимента с гравитационной ловушкой.

В **четвертой главе** автор рассматривает создание новых источников ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия на реакторах ВВР-М и ПИК (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ). Актуальность этой задачи обусловлена тем, что точность экспериментов с ультрахолодными нейтронами в настоящее время ограничена статистикой. В главе описана история создания и развития источников ультрахолодных нейтронов. Приведены схемы и описания создаваемых источников с использованием сверхтекучего гелия. При помощи разработанной компьютерной модели автором получены плотности ультрахолодных нейтронов, которые можно получить в ловушках экспериментов по измерению электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона и времени жизни нейтрона. Проведена оптимизация параметров источников. Расчетная плотность ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-М на два порядка величины превышает плотность на существующих в мире источниках. Расчетная плотность на реакторе ПИК получается на порядок величины хуже, чем на реакторе ВВР-М.

В **пятой главе** диссертантом рассмотрен эксперимент по измерению времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой. Эксперимент реализован на реакторе в Институте Лауэ-Ланжевена (ИЛЛ) (г. Гренобль, Франция). При помощи созданной компьютерной модели автором проведен анализ эксперимента на всех его стадиях – от конструирования установки до получения результата. В главе подробно описываются установка, экспериментальный метод и разработанная физико-математическая модель. Произведено моделирование с различными параметрами установки и процесса измерений. Получено совпадение расчета с экспериментом на временных диаграммах измерений. Рассчитаны систематические неопределенности, связанные с функцией потерь ультрахолодных нейтронов при соударениях, расчетом эффективной частоты соударений, неточностью установки угла ловушки. Полученные значения позволили заявить результат эксперимента с указанной точностью.

В **шестой главе** говорится о эксперименте по поиску ЭДМ нейтрона. В главе приводится история и перспективы понижения экспериментального предела на ЭДМ нейтрона. Эксперимент ПИЯФ осуществлен на реакторе ИЛЛ при помощи двухкамерного магнитно-резонансного спектрометра с хранением ультрахолодных нейтронов. Приведены описание метода и схема установки. Автором разработана Монте Карло

модель спектрометра, при помощи которой получен систематический эффект от токов утечки. Данный эффект был учтен при получении результата эксперимента.

В **седьмой главе** рассматривается разработка эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций с использованием ультрахолодных нейтронов. Такой эксперимент разрабатывается впервые, и он становится конкурентоспособным по сравнению с пучковым экспериментом благодаря созданию новых производительных источников ультрахолодных нейтронов. Для получения чувствительности эксперимента разработана его компьютерная модель на новом источнике ультрахолодных нейтронов, создаваемом на реакторе ВВР-М. Автором показано, что может быть достигнуто улучшение существующей чувствительности в 10-40 раз в зависимости от модели отражения нейтронов от стенок ловушки. Отмечено, что по сравнению с пучковым экспериментом реализация эксперимента с ультрахолодными нейтронами является более компактной и менее дорогостоящей.

В **восьмой главе** говорится о эксперименте «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино на реакторе СМ-3 (г. Димитровград, Россия). В главе дан обзор истории вопроса и текущего состояния в данной области. Приведено описание экспериментальной установки и метода измерений. Автором разработана Монте Карло модель детектора антинейтрино. При помощи модели произведены все необходимые расчеты при проектировании установки. Получен расчетный спектр мгновенных сигналов. Сравнение с экспериментом показало, что между расчётным и экспериментальным спектром наблюдается расхождение в области 3 МэВ.

В **заключении** автор приводит основные результаты диссертационной работы, указывает использованные вычислительные ресурсы, перечисляет гранты, от которых была получена поддержка, выражает благодарности.

Останавливаясь на работе в целом, следует отметить, автором, А.К. Фоминым, проделана большая работа, получен целый ряд **новых, практически важных результатов**, часть которых представляет большой научный и методический интерес. **Практическая значимость** работы состоит в том, что предложенные методы и подходы, разработанные программы могут быть использованы научным сообществом.

**Научная новизна** работы состоит в том, что эксперименты, о которых идет речь в диссертации были смоделированы впервые. Разработано уникальное программное обеспечение. Рассчитаны поправки к существующим экспериментам, получены систематические неопределенности в проводимых экспериментах, разработаны проекты новых установок.

**Достоверность** полученных результатов гарантируется соответствием экспериментальных данных с результатами моделирования, публикациями автора в рецензируемых научных журналах.

Работа выполнена в лаборатории физики нейтрона НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ. Она была поддержана грантами РФФИ, РНФ, Министерства образования и науки Российской Федерации. Результаты докладывались автором на семинарах и многочисленных конференциях в России и за рубежом. Таким образом, они прошли широкую **апробацию** в научном сообществе.

**Личный вклад** автора очевиден из опубликованных работ, созданных результатов интеллектуальной деятельности, выступлений на конференциях, полученных грантов.

К недостаткам работы можно отнести встречающиеся в тексте опечатки и повторы. Небольшие замечания, которые возникли при рассмотрении работы:

- не приведена техническая информация, касающаяся вычислительных ресурсов и программного обеспечения;
- на временных диаграммах в главе 5 не обозначены измерительные циклы, на рисунках со спектрами не указано к чему они относятся;
- в главе 8 не представлены результаты моделирования для детектора антинейтрино без секционирования и для модели детектора.

Однако, отмеченные недостатки не влияют на качество представленных результатов и не снижают общий уровень диссертации.

Результаты диссертации отражены в 33 публикациях в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Разработано 7 результатов интеллектуальной деятельности – программ для ЭВМ. Автореферат и опубликованные работы полно и правильно отражают содержание диссертации. Оформление диссертации выполнено в соответствии с принятыми правилами и стандартами. Результаты исследований, проведенных автором диссертации, представляют несомненную ценность и высокую научную значимость. Научные положения, выносимые А.К. Фоминым на защиту, результаты и выводы диссертационной работы имеют строгое обоснование. Основные результаты диссертации докладывались на международных конференциях и опубликованы в престижных научных журналах. Диссертационная работа ясно изложена. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

Диссертация соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-

математических наук, а её автор Алексей Константинович Фомин заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук,

профессор кафедры экспериментальной физики

В.К. Иванов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

E-mail: [ivanov@physics.spbstu.ru](mailto:ivanov@physics.spbstu.ru)

тел.: +7 (812) 552-77-90

07.05.2020 г.

Подпись В.К. Иванова заверяю

Ведущий специалист по кадрам

А.А. Чернова

Иванов Вадим Константинович, доктор физ.-мат. наук, профессор

01.04.02 «Теоретическая физика»

Список основных публикаций оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15)

- 1) Alexander V. Pavlov, Andrei V. Korol, Vadim K. Ivanov, Andrey V. Solov'yov. "Channeling of electrons and positrons in straight and periodically bent diamond(110) crystals". The European Physical Journal D 74(2). February 2020. DOI: [10.1140/epjd/e2019-100224-3](https://doi.org/10.1140/epjd/e2019-100224-3)
- 2) А.В. Павлов, В.К. Иванов, А.В. Король, А.В. Соловьев "Излучение позитронов и электронов с энергией 375 МэВ при каналировании в прямых и периодически изогнутых кристаллах алмаза". Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12, № 4, С. 108-118. DOI: 10.18721/JPM.12411. ([St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics](https://doi.org/10.18721/JPM.12411). 12 (4) (2019). 108 -118 DOI: 10.18721/JPM.12411)
- 3) A.V. Pavlov, A.V. Korol, V.K. Ivanov and A.V. Solov'yov. "Interplay and specific features of radiation mechanisms of electrons and positrons in crystalline undulators", Journal of Physics B: At. Mol. Opt. Phys. **52** (2019) 11LT01. <https://doi.org/10.1088/1361-6455/ab1bbb>.
- 4) K.B. Agapev, I.I. Vruble, R.G. Polozkov, V.K. Ivanov. " The model of the fullerene C<sub>60</sub> and its ions C<sub>60</sub><sup>+</sup>, C<sub>60</sub><sup>-</sup> pseudopotentials for molecular dynamics purposes", Eur. Phys. J. D (2018) 72: 196 (<https://doi.org/10.1140/epjd/e2018-90229-1>).
- 5) K. B. Agapev, I. I. Vruble, R. G. Polozkov, V. K. Ivanov. "Modeling of C<sub>60</sub> pseudopotential with the different basis sets", IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series **1092** (2018) 012001. doi :10.1088/1742-6596/1092/1/012001
- 6) Агапьев К.Б., Иванов В.К., Король А.В., Соловьев А.В. Каналирование ультрарелятивистских частиц в кристалле алмаза // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 2. С. 139 – 150. DOI: 10.18721/JPM.11213. ([St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics](https://doi.org/10.18721/JPM.11213))
- 7) A.V. Pavlov, K.B. Agapev, V.K. Ivanov, A.V. Korol, A.V. Solov'yov. "Channeling of Electrons and Positrons in Periodically Bent Diamond Crystals". International Conference "Dynamics of Systems on the Nanoscale". (DySoN 2018, October 08-12, 2018, Potsdam, Germany). Book of Abstracts. PS-01, P. 96-97
- 8) I.I. Vruble, K.B. Agapev, R.G. Polozkov, V.K. Ivanov. "Ab-initio Calculations of Potential and Electron Density Distribution of C<sub>60</sub><sup>+</sup>, C<sub>60</sub> and C<sub>60</sub><sup>-</sup>". 4<sup>th</sup> International Conference "Dynamics of Systems on the Nanoscale (DySoN 2016, October 03-07, 2016, Bad Ems, Germany). Book of Abstracts. We-II-3. P. 49-50
- 9) Vruble, I., Polozkov, R. and Ivanov, V. "Ab-initio modeling of an anion C<sub>60</sub><sup>-</sup> pseudopotential for fullerene-based compounds". Eur. Phys. J. D (2016) 70: 167. doi:10.1140/epjd/e2016-60720-x